

# Übersicht zur Anwendung von Automatisierungstechnologien in Bauausführungsprozessen

*P. Pietsch | S. Haghsheno*

DOI: <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201805141201-0>

*Paul Pietsch, M.Sc.*

*Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)*

*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

*paul.pietsch@kit.edu*

*Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Haghsheno*

*Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)*

*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

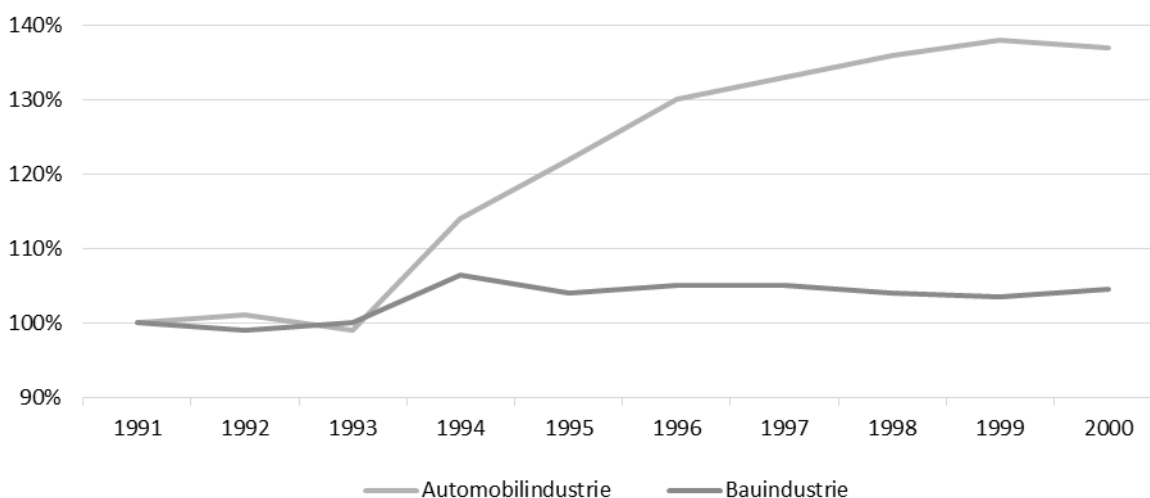
## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>256</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen zur Automatisierung .....</b>	<b>257</b>
	2.1 Begriffsdefinition Automatisierung .....	257
	2.2 Komponenten von automatisierten Anlagen Steuerung .....	257
<b>3</b>	<b>Bedeutung von Building Information Modeling für die automatisierte Arbeitsweise .....</b>	<b>260</b>
	3.1 Definition Building Information Modeling .....	260
	3.2 BIM als Grundlage für die Anwendung von Automatisierungstechnologien auf Baustellen .....	260
<b>4</b>	<b>Automatisierungstechnologien in der Baubranche .....</b>	<b>261</b>
	4.1 Additive Fertigungsverfahren .....	261
	4.2 Robotik .....	264
	4.3 Automatisierte Baumaschinen .....	267
<b>5</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>268</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>269</b>

## 1 Einleitung

Die Bedeutung der Automatisierung spielt in der globalen Ökonomie eine immer wichtigere Rolle. Sie ist einer der antreibenden Motoren unserer Gesellschaft und vereinfacht das Leben in vielen Bereichen des Alltags.

Abbildung 1 stellt das Produktionswachstum der Automobilindustrie im Vergleich zur Bauindustrie in den 1990er Jahren dar. Deutlich zu erkennen ist der starke Anstieg in der Automobilindustrie Anfang der 1990er Jahre. Die Gründe des Anstieges liegen im erstmaligen Einsatz von Industrierobotern bei der durchgängigen Bearbeitung von einfachen und serienmäßigen Arbeitsschritten.<sup>1</sup> Er führte dazu, dass Automobile in wesentlich kürzerer Zeit, ressourceneffizienter und damit auch kosteneffizienter hergestellt werden konnten.



**Abbildung 1: Produktivität der Bau- und Automobilindustrie in Europa in den 1990er Jahre (Balaguer und Abderrahim 2008)**

Die Anwendung von Automatisierungstechnologien in der stationären Industrie konnte sich damals aufgrund der Produktmerkmale besser etablieren als in der Baubranche: Zum einen ist eine automatisierte Produktion von sich wiederholenden Produktionsprozessen, die bei einer Serienfertigung vorzufinden sind, technologisch einfacher umzusetzen. Zum anderen ermöglicht die Massenfertigung von Produkten eine wirtschaftliche Anwendung von Automatisierungstechnologien. Ansätze in der Baubranche, Automatisierungstechnologien einzusetzen, gibt es in Deutschland kaum. Das Bauwesen ist besonders durch Unikatbauwerke sowie sich ändernde Arbeitsstätten mit z.T. unbekannten Gegebenheiten (z.B. Witterung, Bodenbeschaffenheit, etc.) charakterisiert. Diese Randbedingungen erschweren den wirtschaftlichen Einsatz von Automatisierungstechnologien.

Die technologische Entwicklung von Baugeräten in jüngster Zeit ermöglicht jedoch zunehmend automatisierte Herstellungsprozesse auch in der Baubranche.

In den folgenden Ausführungen werden die Grundlagen zur Automatisierung in Industrieprozessen dargestellt. Darauf aufbauend werden Möglichkeiten zur Nutzung der BIM-Methode

<sup>1</sup> Balaguer und Abderrahim 2008

für die Automatisierung von Bauprozessen aufgezeigt. Es werden vorhandene Automatisierungstechnologien der Baubranche identifiziert und im Hinblick auf die autonome Arbeitsweise untersucht. Die Untersuchung basiert auf einer deskriptiven Analyse der Automatisierung und einer Internetrecherche, die der Identifikation der Automatisierungstechnologien diene.

## 2 Grundlagen zur Automatisierung

### 2.1 Begriffsdefinition Automatisierung

Die DIN IEC 60050-35 definiert die Begriffe *selbsttätig* bzw. *automatisch* wie folgt: „[Selbsttätig] wird ein Prozess oder eine Einrichtung bezeichnet, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet“.<sup>2</sup> Anderson (1996) hat entsprechend der Tabelle 1 den Grad der Automatisierung festgelegt.

Tabelle 1: Automatisierungsgrad<sup>3</sup>

<b>Autonome Systeme</b>	Ein Bediener programmiert eine Reihe von Punkten, die z.B. ein Roboter anschließend ausführt.
<b>Teilautomatisierte Systeme</b>	Überlagerung der Eingaben des Bedieners und der Computersteuerung.
<b>Teleoperierende Systeme</b>	Ein Bediener führt alle Aktivitäten des Roboters in Echtzeit über ein Bediensystem aus.

Der höchste Automatisierungsgrad „Autonome Systeme“ sieht vor, dass das System nicht von außen gesteuert wird, sondern in Abhängigkeit seiner Umgebung selbstständig, nämlich autonom reagieren kann.

### 2.2 Komponenten von automatisierten Anlagen Steuerung

Die Steuerungstechnik basiert auf dem Zustand der inneren Gesetzmäßigkeiten<sup>4</sup>, die ein System mit mehreren Größen als Eingangsgrößen, welche andere Größen als Ausgangsgrößen beeinflussen, beschreiben.<sup>5</sup> Die Ausgangsgrößen erteilen Befehle an die Aktoren bzw. Maschinenelemente, das Anzeigefeld und weitere Steuerungseinheiten. Die Steuerung befasst sich mit der Aufnahme, Verarbeitung, gegebenenfalls Weiterleitung und Ausgabe dieser Informationen, um gezielte Aufgaben in der Automatisierungstechnik zu gewährleisten.

#### Regelung

Nach DIN IEC 2007 ist die Regelung ein Vorgang, bei dem eine Größe, die zu regelnde Größe (Regelgröße bzw. Messwert) fortlaufend erfasst und mit einer anderen Größe, der

---

<sup>2</sup> Anderson 1996

<sup>3</sup> Anderson 1996

<sup>4</sup> Prozess oder Zustand, der einem bekannten, regelmäßigen, dokumentierten Ablauf entspricht

<sup>5</sup> Heinrich et al. 2015

Führungsgröße (Sollwert), verglichen und im Sinne einer Angleichung durch den Stellwert an die Führungsgröße beeinflusst wird. In Abbildung 2 wird das Prinzip schematisch dargestellt.

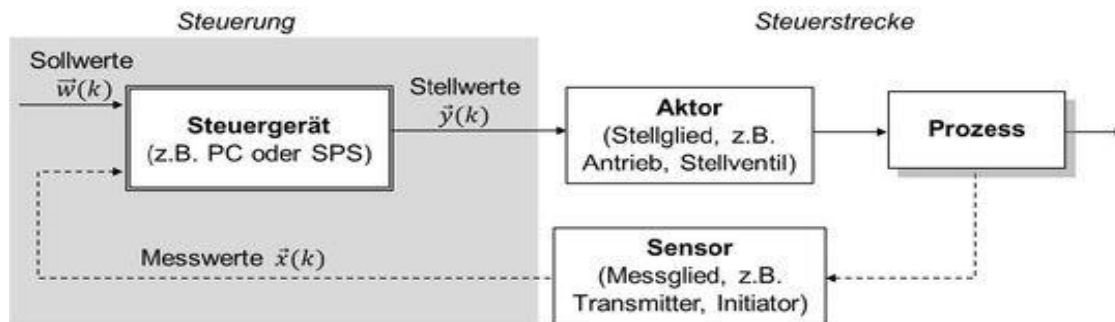


Abbildung 2: Darstellung der Schnittstellen in der Regelungstechnik<sup>6</sup>

### Sensorik

Die Sensorik dient der Erfassung unterschiedlicher physikalischer Effekte, die in Form von elektronischen Messgrößen verarbeitet werden.<sup>7</sup> Technische Systeme einer Sensorik interagieren zunehmend über Feldbusse<sup>8</sup> und anhand einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) mit anderen Systemen zur Regelung, Steuerung oder Automatisierung von Prozessen. Tabelle 2 listet physikalische Parameter sowie den zugehörigen Sensortyp bzw. das zugehörige Messprinzip, um diese zu ermitteln, auf.

Tabelle 2: Sensorisch erfassbare Messgrößen und die geeigneten Sensormechanismen<sup>9</sup>

Parameter	Sensortyp bzw. Messprinzip
Druck	Dehnungsmessstreifen, Siliziummembran, Oberflächenwellen-Resonator
Kraft	Dehnungsmessstreifen, Siliziummembran, Piezo-Wandler, Oberflächenwellen-Resonator
Position, Weg, Länge	Induktiver oder kapazitiver Näherungsschalter, optische Abtastung, Ultraschall
Geschwindigkeit	Kapazitiver oder induktiver Bewegungsmelder, optische Verfahren, Radar
Beschleunigung	Dehnungsmessstreifen, piezoelektrisch, kapazitiv, induktiv
Bewegung, Annäherung	Radar, Bewegungsmelder, optische und induktive Sensoren
Füllstand	Schwimmerabfrage, kapazitive oder optische Messung, Ultraschall, Wärmeleitung
Drehzahl	Optische und induktive Verfahren
Winkelstellung	Inkrementale oder absolute Messung mittels optischer,

<sup>6</sup> Hesse und Schnell 2014

<sup>7</sup> Bernstein 2014

<sup>8</sup> Ein Feldbus ist ein Bussystem, das in einer Anlage Feldgeräte wie Messfühler (Sensoren) und Stellglieder (Aktoren) zwecks Kommunikation mit einem Automatisierungsgerät verbindet

<sup>9</sup> Bernstein 2014

Parameter	Sensortyp bzw. Messprinzip
	kapazitiver oder induktiver Sensoren
Drehmoment	Dehnungsmessstreifen, magnetostruktive Sensoren

Das autonome Arbeiten erfordert eine genaue Umgebungswahrnehmung und ein exaktes Orientieren der Baumaschinen oder einzusetzenden Roboter. Zusätzlich müssen zu jederzeit Informationen über das zu verarbeitende Material (Geometrie, Lagerort) vorhanden sein. Hierzu dienen Datenerfassungstechnologien, von denen einige in Tabelle 3 aufgelistet sind.

**Tabelle 3: Datenerfassungstechnologien für den Einsatz auf der Baustelle<sup>10</sup>**

Technologie	Reichweite	Genauigkeit	Kosten	Anwendung
<u>GPS</u>				
Basis	Sehr weit	10 m	Gering	Positionsermittlung, 3D Maschinenkontrolle, Vermessung
Differential	Weit	1 m	Moderat	
Kinematisch	Weit	< 0.05 m	Moderat	
RF / WI-FI, Bluetooth	Weit	2 – 5 m	Moderat	Anlagenüberwachung, Ortung
RF / Breitband	Moderat	0,5 – 1 m	Moderat	Anlagenüberwachung, Ortung
Laser Innenraum GPS (iGPS)	Moderat	0,2 mm	Sehr hoch	3D Maschinenkontrolle
Magnetometer	Weit	> 1 m	Gering	Anlagenüberwachung
Magnetfeld 6D Positionierung	Klein	< 1 mm bis 5 cm	Hoch	Maschinenkontrolle, Anlagenüberwachung
Laser Tachymeter	Weit Weit	1 mm 0.001 mm	Moderat Sehr Hoch	Vermessung, 3D Maschinenkontrolle
Optische Tracker	Klein (< 10 m)	> 0.001 mm	Hoch	3D Maschinenkontrolle, Qualitätskontrolle
MEMS basierte Inertial Positionierung	Moderat	Ungenauere Werte	Gering	Anlagenüberwachung

Damit in Echtzeit eine situationsbewusste und kontrollierte Herstellungsweise gewährleistet wird, wurde u.a. auch das laserbasierte 3D-Bildgebungssystem, auch unter dem Begriff LIDAR (Light Detection And Ranging) entwickelt.<sup>11</sup> Dieses System misst Distanzen zu anderen Objekten und erstellt ein detailliertes Abbild der bestehenden Umgebung in 3D. Diese

<sup>10</sup> Vähä et al. 2013

<sup>11</sup> Heinrich et al. 2015

und weitere Technologien werden künftig Schlüsselfaktoren für die autonome Arbeitsweise auf der Baustelle sein.

### 3 Bedeutung von Building Information Modeling für die automatisierte Arbeitsweise

#### 3.1 Definition Building Information Modeling

Building Information Modeling (BIM) beschreibt eine digitale Methode, der ein dreidimensionales Gebäudedatenmodell (CAD-Modell) mit Informationen zu physikalischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks zugrunde liegt.<sup>12</sup> Die BIM-Methode beinhaltet die Aufnahme relevanter Bauwerksdaten aus der Planung, Ausführung und Nutzung, die in einer zentralen Datenbank gespeichert werden. Die zusammengeführten Prozesse in einem BIM-Modell haben das Potenzial die Produktivität, Effizienz, Qualität und Nachhaltigkeit zu verbessern.<sup>13</sup>

#### 3.2 BIM als Grundlage für die Anwendung von Automatisierungstechnologien auf Baustellen

In der stationären Industrie wurde die Planung und Ausführung von automatisierten Herstellungsprozessen anhand der Entwicklung der sogenannten CAx-Systeme und weiterer Systeme möglich. All diese Systeme basieren auf der numerischen digitalen Planung und Steuerung (Numerical Control, NC). In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die wichtigsten Abkürzungen dieser Systeme aufgeschlüsselt.

**Tabelle 4: Aufschlüsselung der Abkürzungen von CAx-Systemen und weiteren**

CNC	Computer Numerical Control (rechnergestützte numerische Steuerung)
CAD	Computer Aided Design (rechnergestützte Konstruktion)
CAM	Computer Aided Manufacturing (rechnergestützte Fertigung)
CAQ	Computer Aided Quality Assurance (rechnergestützte Qualitätssicherung)
CIM	Computer Integrated Manufacturing (computerintegrierte Produktion)

CIM umfasst alle Computertechnologien (CNC, CAD, CAM, CAQ u.w.) der beteiligten Akteure, die den Produktionsbetrieb unterstützen, um den Informationsfluss in der Fertigung zu optimieren.<sup>14</sup> Es legt die einzelnen Schritte für die Werkzeugbewegung in einem Programmcode fest, die ggf. mit einer 3D-Simulation optimiert werden können. Damit ein reibungsloser Ablauf aller Prozesse gewährleistet ist, werden sowohl in der Planung als auch bei der Fertigung über ein CAQ-Programm kontinuierliche Qualitätskontrollen durchgeführt. Die Anwendung von CNC ist insbesondere bei subtraktiven und additiven Fertigungsverfahren verbreitet, wobei für letzteres auch immer eine rechnergestützte Konstruktion (CAD) vorhanden sein

<sup>12</sup> Hausknecht und Liebich 2016

<sup>13</sup> Vernikos 2012

<sup>14</sup> Vajna et al. 2009

muss. Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) sowie die genannten Sensortechnologien ermöglichen den heutigen Automatisierungsgrad in der stationären Industrie. Die BIM-Methode erfüllt im Prinzip dieselben Anforderungen wie CIM, nur übertragen auf das Bauwesen. Ein digitales Modell kann alle relevanten Informationen in Form von numerischen Daten zur automatisierten Steuerung von Baugeräten und anderen Herstellungstechnologien liefern. Die Nutzung eines 3D-Modells wird bereits jetzt zur Prozess- und Terminoptimierung bei der Ausführung von Bauprojekten genutzt. Auch wird das Qualitätsmanagement zunehmend mit dem CAD-Modell in Form einer digitalen Baudokumentation gekoppelt. Die erzeugten numerischen Daten können mit den Datenerfassungstechnologien (siehe Tabelle 3) der automatisierten Baumaschinen oder Roboter abgeglichen und für die Aktualisierung des CAD-Modells genutzt werden. Dabei lässt sich die Arbeitsgenauigkeit von autonomen Maschinen durch den Abgleich des CAD-Modells mit den in der Realität erfassten Daten und eines Positionsbestimmungsgeräts (z.B. GPS, W-LAN, etc.) erhöhen.<sup>15</sup> Abbildung 3 veranschaulicht den Abgleichungsprozess.

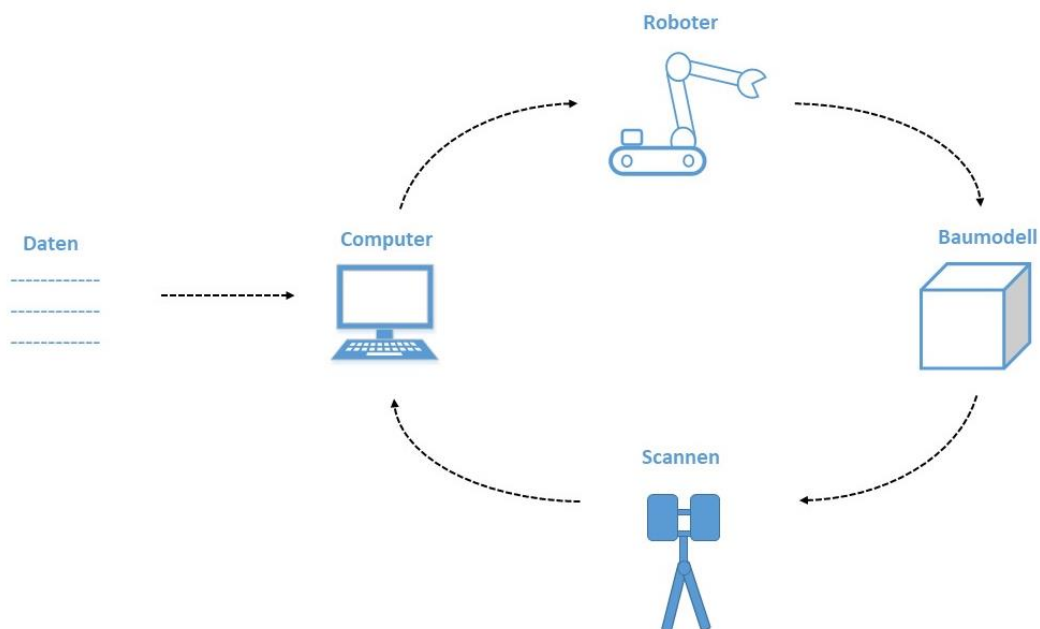


Abbildung 3: Reaktiver Fertigungsprozess für eine höhere Genauigkeit in Anlehnung an<sup>16</sup>

## 4 Automatisierungstechnologien in der Baubranche

In diesem Beitrag werden drei Arten von Automatisierungstechnologien in der Baubranche beschrieben: Additive Fertigungsverfahren, Robotik und automatisierte Baumaschinen.

### 4.1 Additive Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren (AF) - im englischen Additive Manufacturing (AM) - wurden in den 1980er Jahren entwickelt. Damit wird ein Konzept für die automatisierte Herstellung

<sup>15</sup> Helm et al. 2012

<sup>16</sup> in Anlehnung an Helm et al. 2012

dreidimensionaler physischer Objekte auf der Basis eines CAD-Entwurfs, das zuvor an einem Computer erstellt wurde, beschrieben.

AF betrachten einen CAD-Entwurf als eine Anhäufung topographischer Daten. Die Herstellung eines Bauteils verläuft schichtweise, weshalb diese Technologie auch als schichtorientierte Technologie bezeichnet wird.<sup>17</sup> Beim Fertigungsprozess werden aus dem 3D-Modell Lamellen erzeugt, NC-fähig aufbereitet und anschließend an ein CNC-System übermittelt. Danach wird die Materialbeschichtung in einem automatischen Zyklus Schicht für Schicht aufgetragen.

Der CAD-Entwurf liefert die geometrischen Daten eines Objekts und kann als *Standard Template Library* –Format (STL) exportiert werden. Dieses enthält jedoch keine Materialeigenschaften. An dieser Stelle wäre die Nutzung eines BIM-Modells denkbar. Das Industry Foundation Classes Format (IFC) enthält neben den geometrischen Verhältnissen auch Informationen über die Kontur, das Material, die Farbe etc. Mit diesen Informationen können eventuell neue Werkzeuge mit verschiedenen Düsen geplant werden, um das Drucken einer Gebäudekomponente, die aus vielen Baumaterialien zusammengesetzt ist, in einem Zug herzustellen. In Abbildung 4 wird das Konzept einer normalen Modellübersetzung dem IFC-basierten Ansatz gegenübergestellt.

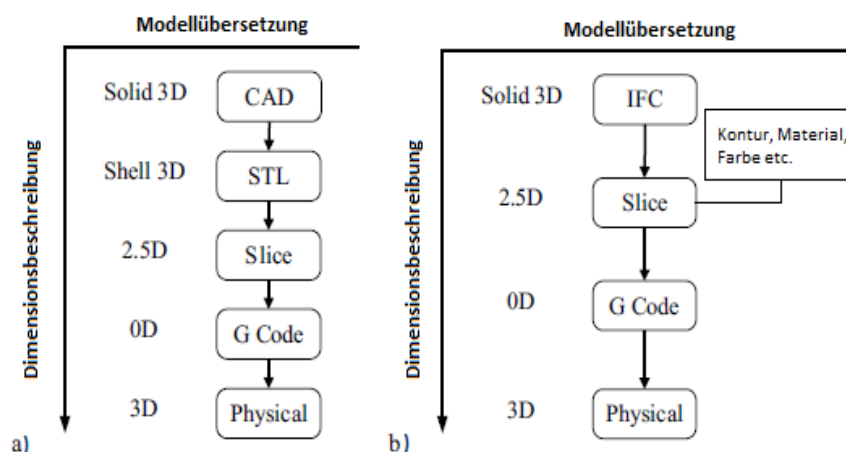


Abbildung 4: Prinzip der Modellübersetzung, in a) traditionelle AM Prozesse, in b) AM Prozesse mit BIM<sup>18</sup>

Für die Bauindustrie eröffnet sich mit den AF eine ganze Reihe neuer Möglichkeiten in der Herstellungsweise. Vorort gedruckte Elemente oder in stationären Werkshallen anhand AF hergestellter Fertigbauteile ermöglichen eine individuellere, schnellere und ressourceneffizientere Herstellung von Gebäudebauteilen oder Gebäudekonstruktionen (Rohbau) im Leichtbau mit komplexen Strukturen.

Das Potential von AF in der Baubranche lässt sich indirekt auch an den jüngsten Entwicklungen im Bereich Industrie und Forschung bewerten. Eine Internetrecherche hat ergeben, dass zehn Universitäten und mind. 14 Unternehmen an AF im Bauwesen forschen und entwickeln (siehe Tabelle 5). Das am häufigsten betrachtete Verfahren ist das „Extrusionsverfahren“

<sup>17</sup> Gebhardt et al. 2016

<sup>18</sup> Ding et al. 2014



(Beton-3D-Druck). Es werden aber auch andere Verfahren wie „Additives Schweißen“ (Unternehmen MX3D) und „Selektives Binden“ (TU München) erforscht.

**Tabelle 5: Unternehmen und Universitäten, die an AF im Bauwesen forschen und entwickeln**

Unternehmen	Land	Jahr	Verfahren
<b>Unternehmen</b>			
Andrey Rudenko / TotalKustom	USA	2014	Beton 3D Druck (Extrusionsverfahren)
Apis Cor	Russland	2014	Beton 3D Druck (Extrusionsverfahren)
Bet Abram	Slowenien	2012	Beton 3D Druck (Extrusionsverfahren)
Branch Technology	USA	2014	C-Fab™
Cazza Construction Technology	Vereinigte Arabische Emirate	2016	Cazza X1 - 3D Beton Druck (Extrusionsverfahren)
Contour Crafting Corporation	USA	2014	Contour Crafting
CyBe	Niederlande	2013	Beton 3D Druck (Extrusionsverfahren)
Imprimere AG	Schweiz	2015	Beton 3D Druck (Extrusionsverfahren)
Monolite UK	UK	2007 (Entwicklung D-Shape)	D-Shape
MX3D	Niederlande	2014	MX3D - "Additives Schweißen"
Overtec	Österreich	3D Druck 2017 Unternehmensgründung 1978	Betonbauteile durch Extrusionsverfahren
Specavia	Russland	3D Drucker seit 2015 Unternehmensgründung 2009	Beton 3D Druck (Extrusionsverfahren)
WinSun /Yingchuang Building Technique Co. Ltd	China	2004 Unternehmensgründung 2003	Beton 3D Druck (Extrusionsverfahren), 3D Druck von Materialien Crazy Magic Stone, Glasfaserverstärkter Kunststoff (FRP), Speziell verstärkter Beton (SRC), Glasfaserverstärkter Gios (GRG)
XtreeE	Frankreich	2015	Beton 3D Druck (Extrusionsverfahren)
<b>Universitäten</b>			
ETH Zürich	Schweiz	DFAB House	- 3 stöckiges Gebäude in Dübendorf weitgehend digital geplant und autonom gebaut - Anwendung 4 verschiedener automatisierter Bauverfahren u.a. 3D Druck

Unternehmen	Land	Jahr	Verfahren
Institute for Advanced Architecture of Catalonia / Tecnalia	Spanien	2017 (basierend auf Projekten von 2014 & 2016)	On Site Robotics
Loughborough University	England	ca. 2007	Freeform 3D Concrete Printing
Swinburne University	Australien	3D Druck mit Geopolymer-Binder	- 3D Druckverfahren von Beton bei dem Portland Zement und Geopolymere (Hergestellt aus industriellen Nebenprodukten) als Binder verwendet werden
TU Dresden	Deutschland	2014	Beton 3D Druck basierend auf Autobetonpumpe
TU Eindhoven	Niederlande	2015	3D Printing Concrete
TU München	Deutschland	2014	Holzleichtbeton
TU München	Deutschland	ca. 2014	Selektives Binden
Universität Nantes / Nantes Digital Science Laboratory (LS2N) in Kooperation mit LafargeHolcim und Bouygues	Frankreich	Ynova BatiPrint3D	- Extrusion von Polyurethan als Kontur der Wände und anschließend Ausgussung mit Beton - Pilotgebäude mit 95 qm im September 2017 gebaut, erfüllt alle französischen Baunormen - Ziel: Bau von Sozialwohnungen
University of Southern California (Khoshnevis)	USA	1998	Contour Crafting

## 4.2 Robotik

Roboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten (Handhabungsgeräte) mit mehreren beweglichen Gliedern (Achsen), deren Bewegung frei programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt ist.<sup>19</sup> Die DIN EN ISO 8373 beschreibt den (Industrie-)Roboter auch als automatisch gesteuerter Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann. Industrieroboter sind in vielen Bereichen der Industrie, z.B. Automobilhersteller und -zulieferer, Luft- und Raumfahrt, Chemie und Pharmazie vertreten.<sup>20</sup>

Grundsätzlich gliedert sich ein Roboter in folgende Teilsysteme:<sup>21</sup>

- **Antriebe** zum Wandeln und Übertragen der notwendigen Energie zu allen Bewegungsachsen und zum Greifer bzw. Werkzeug

<sup>19</sup> DIN EN ISO 8373

<sup>20</sup> DGUV 2015

<sup>21</sup> Siegert und Bocionek 1996

- **Messsysteme** zur Überwachung und Steuerung der Geschwindigkeit und Achsen. Aber auch für die Kontrolle der Stromaufnahme o.ä..
- **Greifer oder Werkzeuge** zum Erfassen, Halten, Bearbeiten und Bewegen eines Werkstücks.
- **Steuerung und Regelung** zum Speichern, Steuern und Überwachen des Programmablaufs, zur Verarbeitung von Sensordaten und zur Kommunikation mit anderen Einrichtungen, z.B. der Peripherie des Roboters.
- **Sensoren** zur Muster- und Lageerkennung von Objekten, zum Messen physikalischer Größen usw.

In Tabelle 6 sind wichtige Kenngrößen eines Industrieroboters nach der VDI-Richtlinie 2861 aufgelistet.

**Tabelle 6: Kenngrößen eines Industrieroboters VDI 2861**

Geometrische Kenngrößen	Belastungskenngrößen	Kinematische Kenngrößen	Genauigkeitskenngrößen
Mechanische Systemgrenzen Raumaufteilung Arbeitsbereich	Nennlast Maximale Nennlast Maximallast Nennmoment Nenn- und Massenträgheitsmoment	Geschwindigkeit Beschleunigung Überschwingweite Ausschwingzeit Verfahrzeit Zykluszeit	- Wiederhol- und Positioniergenauigkeit (Position und Orientierung) - Wiederhol- und Positioniergenauigkeit (Bahnsteuerung)

Ein Industrieroboter kann zur Handhabung von Material eingesetzt werden, um beispielsweise monotone, anstrengende und gefährliche Arbeiten auszuführen. Dazu gehört das Umsetzen oder Montieren von Bauteilen, wobei die Teile vielfach schwer, heiß, kalt, scharfkantig oder sogar radioaktiv sein können.

Die auf Basis einer Internetrecherche erstellte Tabelle 7 listet Beispiele von Forschungsprojekten zum Einsatz von Robotern auf der Baustelle sowie deren Tätigkeitsbereich auf. Dabei wird zwischen Robotern für Materialbewegungsprozessen und Montage- und Verbindungsprozessen unterschieden.

Tabelle 7: Ausgewählte Forschungsprojekte zum Einsatz von Robotik auf der Baustelle

Bezeichnung	Geräteart	Tätigkeit, (Automatisierungsgrad)	Institut/Unternehmen
<b>Materialbewegungsprozesse</b>			
Masonry Robot System ROCCO	Autokran	Maurerarbeiten, Material disponieren (autonom)	Universität Karlsruhe
NIST Robocrane	Autokran, Portal-kran, Turmkran	Material disponieren (autonom)	NIST Gaithersburg
Fliesenplatzierung	Industrieroboter	Fliesen legen (autonom)	Harvard Graduate School of Design
SAM (halbautomatisches Mauerwerk)	Mobiler Industrieroboter	Maurerarbeiten (teilautomatisiert)	Construction Robotics (USA)
dimRob	Mobiler Industrieroboter	Maurerarbeiten (autonom)	ETH Zürich
HADRIAN 105	Mobiler Roboter	Maurerarbeiten (autonom)	Fastbrick Robotics (Australien)
<b>Montage- und Verbindungsprozesse</b>			
Innenwand Streichroboter	Mobiler Roboter	Innenwand Streichen	Dept. IESCE (India)
Automatisierter Spritzbetonverfahren	Mobiler Roboter	Spritzbetonverfahren	ETH Zürich
Schweißroboter	Industrieroboter	Schweißen	Kokushikan University (Japan)
Betonoberflächenbehandlung	Mobiler Roboter	Glätten von Betonoberflächen	Kokushikan University (Japan)

Der Einsatz von Robotern und automatisierten Baumaschinen beruht auf der Übertragung der Methoden und Prinzipien aus der stationären Industrie in den Bausektor. Auf einer Baustelle werden zwar ähnlich wie in den Produktionshallen der stationären Industrie Räume bzw. Standorte der Maschinen in strukturierte Arbeitsbereiche definiert. Jedoch ändert sich der Ablauf und Aufbau einer Baustelle mit der Zeit kontinuierlich nach jedem Arbeitsschritt. Folglich sind die Bedingungen auf der Baustelle komplex und heterogen. Deshalb werden Roboter mit einer hohen Auffassungsgabe und Flexibilität von entscheidender Bedeutung sein, die sich in einem freien Umfeld ungehindert durch mögliche Hindernisse bewegen können.<sup>22</sup>

---

<sup>22</sup> S.M.S Elattar 2008

Dabei stellt die autonome Navigation eines Systems den Kernpunkt beim Einsatz auf der Baustelle dar. Dementsprechend setzen Siegart und Nourbakhsh für die erfolgreiche Umsetzung die folgenden vier Punkte voraus:<sup>23</sup>

- Datensammlung: eingehende Daten aus der Sensorik richtig erfassen und extrahieren.
- Lokalisierung: eigene Lageposition auf dem Feld bestimmen.
- Bahnplanung: bestimmen, über welchen Weg ans Ziel zu kommen.
- Kontrollsystem: Größen regulieren, um am Ziel anzukommen.

### 4.3 Automatisierte Baumaschinen

Bei Baumaschinen handelt es sich um stationäre, semimobile oder mobile Maschinen, die (grobe) Baustoffe zumeist in großen Mengen transportieren und/oder be- und verarbeiten.<sup>24</sup> Häufig werden sie von Verbrennungsmotoren angetrieben, je nach Anwendung und Situation (z.B. Untertage) auch von Elektromotoren. Die Baugeräteliste (BGL) unterscheidet Baumaschinen in 21 Gerätehauptgruppen. Das Potenzial zur Automatisierung von Baumaschinen hängt besonders von deren Tätigkeitsfeldern ab. Sich wiederholende, monotone Tätigkeiten mit einer möglichst geringen Anzahl unterschiedlicher bzw. komplexer Aufgaben lassen sich wesentlich leichter automatisieren als sich häufig wechselnde heterogene Aufgaben. Eine Recherche zu Projekten und von Unternehmen, die sich mit automatisierten Baumaschinen beschäftigen, ist in Tabelle 8 zusammengefasst.

**Tabelle 8: Forschungsprojekte zu bzw. Prototypen von automatisierten Baumaschinen**

Bezeichnung	Geräteart	Tätigkeit	Unternehmen/Institut
HAMM	Autonome Walze	Bodenverdichtung	Hamm, Wirtgen Group
Teilautomatisierte Rammmaschine	Ramme	Rammen, Erstellen von Pfahlkonstruktion	University of Oulu, Finland
LUCIE	teleoperierter Bagger	Erdarbeiten, Materialbewegung usw.	Fujita Research
CAT 3D	Autonome Planierdraupe	Erdarbeiten, Planieren	Caterpillar
SCREEDSAVER	Autonome Estrichmaschine	Estricharbeiten	Ligchine
Surf Robo	Betonglätter	Betonglätten, nachbehandlung	Takenaka
Bulldozer	Autonomer Bulldozer	Erdarbeiten, Planieren	Built Robotics
AMMANN Prototyp	Autonom fahrende Vibrationsplatte	Verdichtung	Ammann

<sup>23</sup> Siegart und Nourbakhsh 2004

<sup>24</sup> Bauer 2007

Bezeichnung	Geräteart	Tätigkeit	Unternehmen/Institut
Pavers	Beton Gleitschalungs-system	Schalen und Asphaltieren	Gomaco
Circ	Steuerungssystem für Walzen	Bodenverdichtung	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Accugrade	Steuerungssystem für Grader	Planieren	Caterpillar
BIM-basierter Turmdrehkran	Autonomer Turmdrehkran	Materialdisposition	Yonsei University, Gyeongsang National University

Insbesondere im Bereich der Materialbewegung sowie Materialbearbeitung und –verarbeitung wird die Automatisierung vorangetrieben. Da es im Bereich der Navigation große technologische Fortschritte gibt, beschäftigen sich Unternehmen zunehmend mit autonomen Bewegungsprozessen von Baumaschinen. Baumaschinen führen meistens nur eine monotone Aufgabe aus (z.B. Glätten, Planieren, Transportieren, Verdichten, Rammen, etc.), die anhand der Komponenten der Automatisierung (Steuerung, Regelung, Sensorik) auch ohne Personal durchgeführt werden kann. Entscheidend für die Navigation sind die Umgebungswahrnehmung und vorhandene Informationen zur Umgebung. In diesem Zusammenhang können die beim Einsatz der Methode BIM aus den formalen Daten generierten Bauwerksmodelle unterstützen. So haben beispielsweise Lee et al. ein Turmkrannavigationssystem entwickelt, das mit verschiedenen Sensoren und einem Bauwerksmodell ausgestattet ist, um in Echtzeit, dreidimensionale Informationen über das Bauwerk, die Umgebung und Position des Transportguts zu erhalten.<sup>25</sup>

## 5 Fazit

Ein Bauwerk besteht häufig aus vielen Einzelteilen und Gewerken, die im Laufe der Bauphase nacheinander zusammengeführt werden. Das Ergebnis ist ein komplexes Zusammenspiel aus Planung, Einsatz von sehr unterschiedlichen technologischen Geräten und verwendeten Baumaterialien auf der Baustelle. Zudem verändern sich die Bedingungen auf Baustellen kontinuierlich mit dem Fortschritt des Bauprojekts und sind deshalb im Vergleich zur stationären Industrie sehr heterogen. Das stellt erhöhte Anforderungen an Automatisierungstechnologien, insbesondere im Bereich der autonomen Arbeitsweise dar. Hierbei kann die Methode BIM mit dem erzeugten Bauwerksmodell unterstützend wirken. Dieses kann numerische Informationen zur Steuerung und Regelung automatisierter Baumaschinen und Roboter auf der Baustelle liefern. Des Weiteren kann das Bauwerksmodell die benötigten numerischen Daten für die additive Fertigung zur Verfügung stellen. Das ermöglicht die Produktion von sehr individuellen vorgefertigten Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien im Leichtbau oder eine automatisierte Rohbauerstellung mittels 3D-Betondruckverfahren. Gleichzeitig

<sup>25</sup> Lee et al. 2012

ermöglichen zunehmend die technologischen Fortschritte in der Navigation (z.B. das LIDAR-System) die automatisierte Arbeitsweise von Baumaschinen.

## **6 Zusammenfassung**

Dieser Beitrag gibt eine Übersicht über den aktuellen Stand in Forschung und Praxis im Hinblick auf Automatisierungstechnologien in Bauausführungsprozessen. Während die Einführung der Robotik und andere Automatisierungstechnologien zu einem nachhaltigen Produktionswachstum in der stationären Industrie geführt haben, hat sich die Produktion der Bauindustrie in den letzten Jahrzehnten quasi nicht verändert. Dies liegt u.a. daran, dass die Anwendung von Automatisierungstechnologien in der Baubranche durch die sich ständig ändernde Umgebung erschwert ist. Die fortschreitende Technologie sowie die Einführung neuer digitaler Methoden wie Building Information Modeling ermöglichen aber zunehmend den Einsatz von Automatisierungstechnologien. In diesem Beitrag werden Automatisierungstechnologien in die Kategorien Additive Fertigungsverfahren, Robotik und autonome Baumaschinen eingeordnet. Zu jeder Kategorie wurden vorhandene Technologien, die im Rahmen von Forschungsprojekten an Universitäten oder in Unternehmen entwickelt wurden, ermittelt. Die Untersuchung ergab, dass u.a. die Entwicklung moderner Navigationssysteme (LIDAR), die der autonomen Bewegung von Robotern und Baumaschinen dienen, und Technologien der Additiven Fertigung vielversprechende Ansätze liefern, Bauausführungsprozesse zu automatisieren.

## Literaturverzeichnis

### Anderson, R. J. (1996)

*Autonomous, teleoperated, and shared control of robot systems.* In: Proceedings 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, MN, USA, 22-28 April 1996. IEEE Robotics and Automation Society Staff; IEEE, Society Staff. Piscataway: IEEE, S. 2025–2032.

### Balaguer, Carlos; Abderrahim, Mohamed (2008)

*Trends in Robotics and Automation in Construction.* In: Kuo-Chuan Shih, Chun-Nen Huang und Shu-Shun Liu (Hg.): Precast Storage and Transportation Planning via Component Zoning Optimization: INTECH Open Access Publisher.

### Bauer, Hermann (2007)

*Baubetrieb.* 3., vollständig neu bearbeitete Auflage (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32533-5>.

### Bernstein, Herbert (2014)

*Messelektronik und Sensoren.* Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).

### DGUV (2015):

*Industrieroboter.* 209-074. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.

### Ding, Lieyun; Wei, Ran; Che, Haichao (2014):

*Development of a BIM-based Automated Construction System.* In: *Procedia Engineering* 85, S. 123–131. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.536.

### Gebhardt, Andreas; Kessler, Julia; Thurn, Laura (2016):

*3D-Drucken.* Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser.

### Hausknecht, Kerstin; Liebich, Thomas (2016):

*BIM-Kompodium.* Building Information Modeling als neue Planungsmethode. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

### Heinrich, Berthold; Linke, Petra; Glöckler, Michael (2015):

*Grundlagen Automatisierung.* Sensorik, Regelung, Steuerung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05961-3>.

### Helm, Volker; Ercan, Selen; Gramazio, Fabio; Kohler, Matthias (2012):

*Mobile robotic fabrication on construction sites.* DimRob. In: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012). Vilamoura-Algarve, Portugal, 07.10.2012 - 12.10.2012: IEEE, S. 4335–4341.



**Hesse, Stefan; Schnell, Gerhard (2014):**

*Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Funktion - Ausführung - Anwendung.* 6., korr. und verb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=853602>.

**Lee, Ghang; Cho, Joonbeom; Ham, Sungil; Lee, Taekwan; Lee, Gaang; Yun, Seok-Heon; Yang, Hyung-Jun (2012):**

*A BIM- and sensor-based tower crane navigation system for blind lifts.* In: *Automation in Construction* 26, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.05.002.

**DIN EN ISO 8373, November 2010:**

*Roboter und Robotikgeräte.* Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-en-iso-8373/135207964>.

**S.M.S Elattar (2008):**

*AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES.* In: *Emirates Journal for Engineering Research* (13), S. 21–26. Online verfügbar unter <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.524.7909&rep=rep1&type=pdf>.

**Siegert, Hans-Jürgen; Bocionek, Siegfried (1996):**

*Robotik. Programmierung intelligenter Roboter.* Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-80067-2>.

**Siegwart, Roland; Nourbakhsh, Illah Reza (2004):**

*Introduction to autonomous mobile robots.* Cambridge, Mass: MIT Press (Intelligent robotics and autonomous agents). Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=122550>.

**Vähä, Pentti; Heikkilä, Tapio; Kilpeläinen, Pekka; Järviluoma, Markku; Gambao, Ernesto (2013):**

*Extending automation of building construction — Survey on potential sensor technologies and robotic applications.* In: *Automation in Construction* 36, S. 168–178. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.08.002.

**Vajna, Sandor; Hehenberger, Peter; Zeman, Klaus; Bley, Helmut; Weber, Christian (2009):**

*CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung.* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

**Vernikos, Vasileios (2012):**

*Optimising building information modelling and off-site construction for civil engineering.* In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 165 (4), S. 147. DOI: 10.1680/cien.2012.165.4.147.